

## RESEARCH OF RESIDUAL STRESS IN BENDING OF TUBE WITH ROLLING

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ГИБКЕ ТРУБ С РАСКАТЫВАНИЕМ

А.В. Козлов, Е.П. Аньчикова, А.П. Дементьев  
ФГБОУ ВПО Южно-Уральский государственный университет (НИУ),  
г. Челябинск  
[kozlov@zb-susu.ru](mailto:kozlov@zb-susu.ru)

The article is about research the residual stresses, arising during bending of tube with rolling, given the results of computer simulation and experimental methods to assess residual stress.

Гибка труб с раскатыванием [1] обеспечивает существенное снижение изгибаемых усилий, однако этот процесс сопровождается значительными пластическими деформациями.

Компьютерное моделирование процесса гибки с раскатыванием [2] показало, что в деформируемой трубе возникает достаточно сложное и неоднородное по сечению напряженно-

деформированное состояние. В верхней части заготовки преобладают растягивающие тангенциальные и продольные напряжения, а в нижней – сжимающие (рис. 1). При этом если судить по общей интенсивности деформации, наружные слои трубы испытывают существенно (в несколько раз) большую деформацию по сравнению со слоями, прилегающими к гибочному ролику.

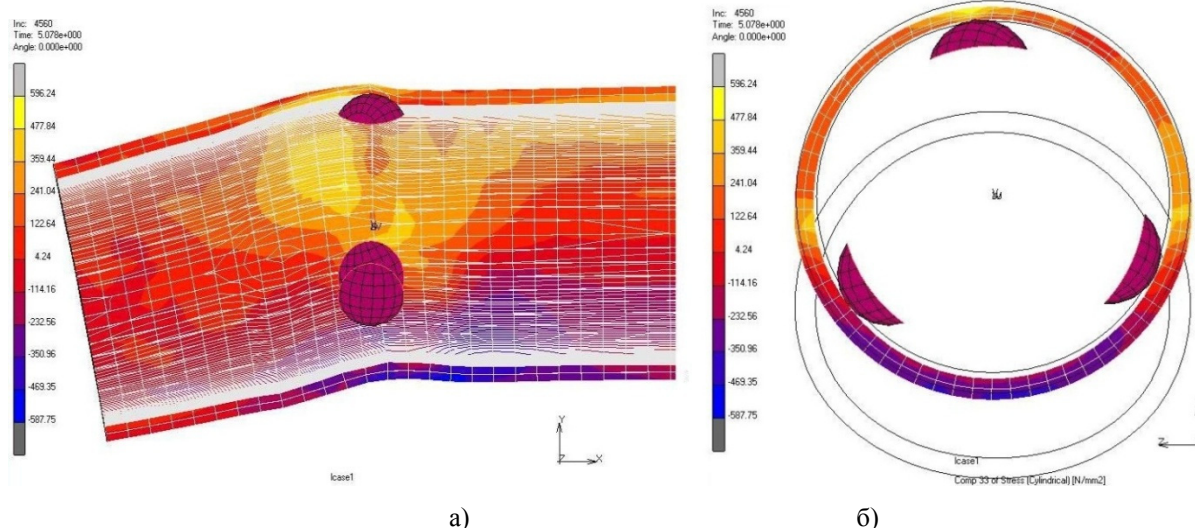


Рис. 1. Результаты компьютерного моделирования в среде SuperForm:  
а – распределение продольных напряжений (продольное сечение);  
б – распределение тангенциальных напряжений (поперечное сечение)

В месте контакта заготовки и инструмента возникают сжимающие радиальные напряжения, а в стенках трубы, где контакта нет, появляются растягивающие напряжения. Таким образом, в радиальном направлении металл подвергается чередующимся сжимающим и растягивающим напряжениям.

Опыт эксплуатации изделий, используемых в различных областях техники, и экспериментальные данные показывают, что остаточные напряжения влияют на износостойкость, коррозионную стойкость и в целом на долговечность деталей и могут быть одной из главных причин техногенных аварий и разрушений надежных, на первый взгляд, конструкций [3].

Существует достаточно много методов оценки остаточных деформаций и напряжений. В зависимости от способов воздействия на объект их

можно разделить на механические и физические методы.

Механические методы (метод полосок, метод колец, метод обтачивания, метод полного разрушения и т.д.) основаны на принципе упругой разгрузки объема металла при его освобождении от остаточных напряжений путем разрезки. Измеряя деформации, возникающие при разрезке, можно вычислить остаточные напряжения по формулам теории упругости. Механические методы наиболее достоверны, однако они требуют «разрушения» или нарушения целостности конструкции. Кроме того, механические методы измеряют конкретные значения напряжений в конкретной области.

Физические методы (рентгеновский метод, метод твердости, метод хрупких покрытий, электромагнитные методы, метод магнитной памяти металла и др.) основаны на изменении физических свойств материалов в зависимости от степени упру-

гого деформирования. Они не требуют разрушения конструкции. Однако для их применения необходимы образцы-эталоны, сделанные из того же материала, но свободные от остаточных напряжений.

Теоретически рассчитать остаточные напряжения, учитывая историю получения детали, затруднительно из-за сложности физических и технологических процессов. Поэтому для определения остаточных напряжений в поверхностных слоях нами были использованы экспериментальные и расчётно-экспериментальные методы, основанные на травлении внутренних поверхностей исследуемых образцов. После разрезки измеряются деформации образцов, возникающие

вследствие разгрузки от остаточных напряжений [4].

Так в качестве образца использовался участок гнутой с помощью раскатывания трубы  $D=60 \times 3,5$  мм, с радиусомгиба  $2D$ , массой 1,5 кг, материал трубы – сталь 10.

Была разработана установка для электролитического травления, схема которой показана на рис. 2. К электродам – детали и прутку – подводился ток силой 10 А, что вызвало электролитическое растворение внутренней стенки трубы. В процессе растворения внутренней стенки из-за наличия в трубе остаточных напряжений, происходит ее деформация, которая передается на рычаг (рис. 3).

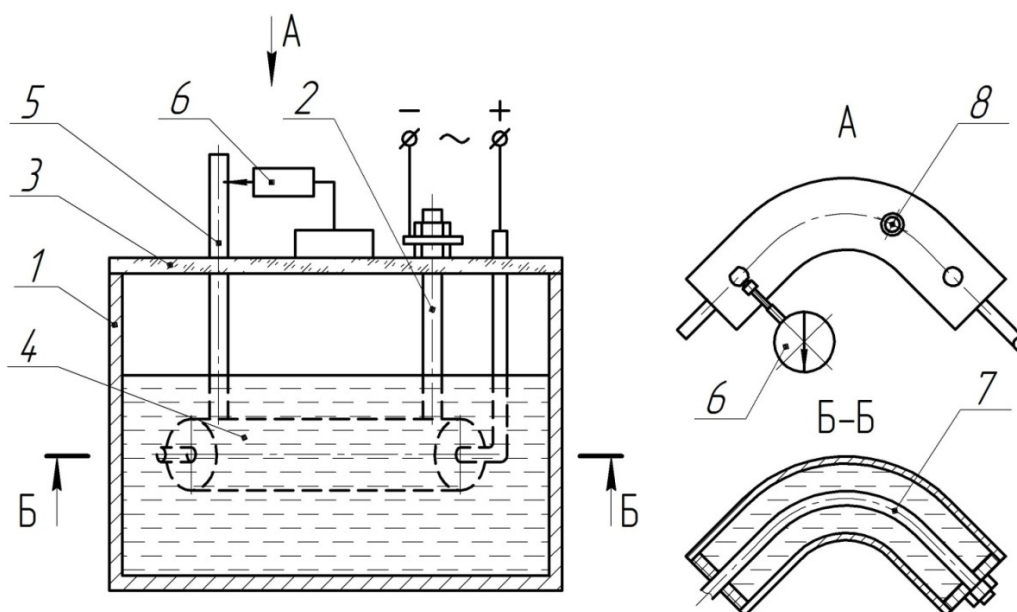


Рис. 2. Установка для электролитического травления:

1 – бак, 2 – штатив, 3 – крышка, 4 – исследуемый образец (гнутая труба),  
5 – рычаг, 6 – индикатор, 7 – электрод, 8 – коническое отверстие



Рис. 3. Общий вид установки

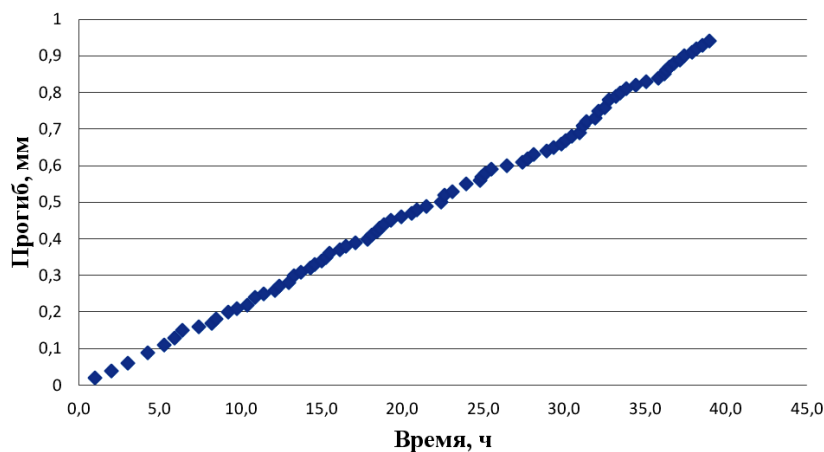


Рис. 4. График зависимости деформации трубы от времени

За время исследований были замерены величины деформаций, на основании которых построен график зависимости деформации трубы от времени (рис. 4). Из графика видно, что с увеличением времени величина деформации возрастает практически прямо пропорционально. В целом за время проведения эксперимента труба «выпрямилась» на 1 мм, что свидетельствует о значительных остаточных напряжениях, которые могут сказаться на надежности трубопровода.

Оценка остаточных деформаций производилась и с использованием кольцевых образцов вырезанных из различных участков гнутой трубы (рис. 5). Кольцевые образцы разрезались по образующей, и измерялся их диаметр. После этого наружные и боковые поверхности, которые не должны подвергаться травлению, покрывались лаком.

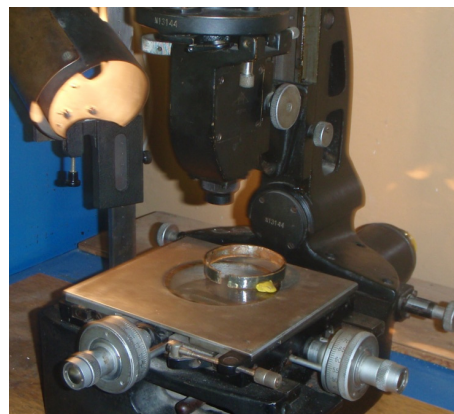
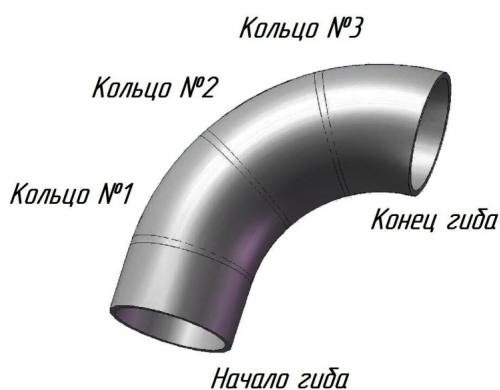


Рис. 5. Схема вырезки и измерение деформаций образцов с помощью микроскопа

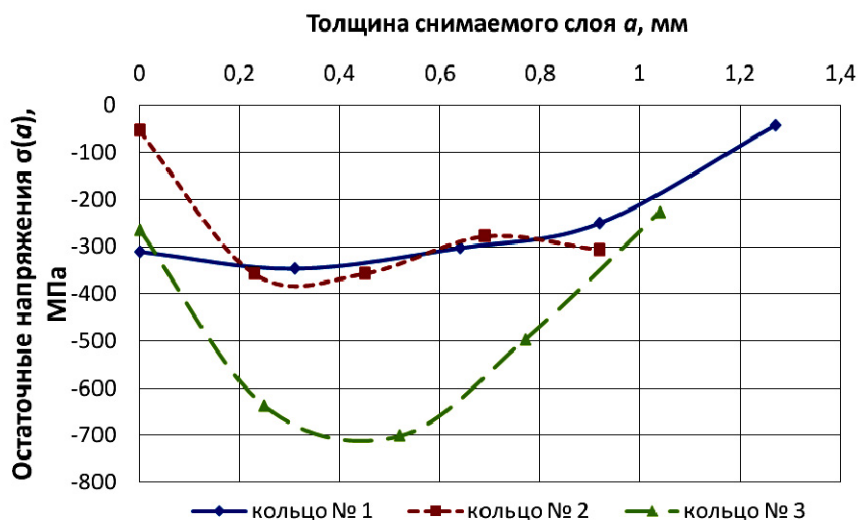


Рис. 6. Распределение остаточных напряжений в трубе

Далее проводилось последовательное снятие слоев с помощью электролитического травления. В процессе растворения металла из-за наличия в кольце окружных остаточных напряжений, происходит его деформация. По результатам расчетов построены графики зависимости остаточных напряжений от глубины (рис. 6).

Результаты эксперимента показывают, что в поверхностных слоях всех образцов создаются сжимающие напряжения. Напряжения достигают максимального значения на глубине 0,2..0,5 мм, после чего постепенно уменьшаются. Наличие деформированного слоя подтверждается исследованиями структуры гнутых отводов [5]. Для структуры этого слоя характерна большая вытянутость элементов структуры в виде темных и светлых полос с очень сложным их расположением. Образование слоя следует объяснить пластическим течением металла в результате раскатывания.

По мере увеличения деформаций к концугиба возрастают и напряжения. Так напряжения в образце, вырезанном из концагиба, в 2 раза превышают напряжения в кольцах из начала и середины.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили выполнить предварительные оценки характера распределения и величин остаточных напряжений при гибке труб с раскатыванием.

## Библиографический список

1. Козлов, А.В. Технология и оборудование холодной гибки тонкостенных труб: монография / А.В. Козлов, А.В. Бобылев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 169 с.
2. Козлов, А.В. Компьютерное моделирование процесса гибки труб с раскатыванием / А.В. Козлов, В.Г. Шеркунов // Известия ТулГУ. Серия «Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением». Вып. 3. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. – С. 28–33.
3. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах / Г.Н. Чернышев, А.Л. Попов, В.М. Козинцев, И.И. Пономарев. – М.: Машиностроение, 1996. – 240 с.
4. Биргер, А.И. Остаточные напряжения / А.И. Биргер. – М.: Машиностроение, 1963. – 223 с.
5. Козлов, А.В. Комплексное исследование свойств материала отводов гнутых, получаемых гибкой с раскатыванием / А.В. Козлов, В.Г. Шеркунов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2007 – № 25. – Вып. 10.